

Rec'd PCT/PTO 12 JUL 2005

PCT/IB 04 / 00039

14.01.04

10/542132



Europäisches
Patentamt

European
Patent Office

Office européen
des brevets

REC'D 4 FEB 2004

WIPO

PCT

Bescheinigung

Certificate

Attestation

Die angehefteten Unterlagen stimmen mit der ursprünglich eingereichten Fassung der auf dem nächsten Blatt bezeichneten europäischen Patentanmeldung überein.

The attached documents are exact copies of the European patent application described on the following page, as originally filed.

Les documents fixés à cette attestation sont conformes à la version initialement déposée de la demande de brevet européen spécifiée à la page suivante.

Patentanmeldung Nr. Patent application No. Demande de brevet n°

03100076.3

**PRIORITY
DOCUMENT**

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

Der Präsident des Europäischen Patentamts;
Im Auftrag

For the President of the European Patent Office

Le Président de l'Office européen des brevets
p.o.

R C van Dijk

best Available Copy

Anmeldung Nr:
Application no.: 03100076.3
Demande no:

Anmeldetag:
Date of filing: 16.01.03
Date de dépôt:

Anmelder/Applicant(s)/Demandeur(s):

Philips Corporate Intellectual Property GmbH
Habsburgerallee 11
52064 Aachen
ALLEMAGNE
Koninklijke Philips Electronics N.V.
Groenewoudseweg 1
5621 BA Eindhoven
PAYS-BAS

Bezeichnung der Erfindung/Title of the invention/Titre de l'invention:
(Falls die Bezeichnung der Erfindung nicht angegeben ist, siehe Beschreibung.
If no title is shown please refer to the description.
Si aucun titre n'est indiqué se referer à la description.)

Digitaler Zustandsregler für Hochspannungserzeuger mit gemischtem
Modulationsverfahren

In Anspruch genommene Priorität(en) / Priority(ies) claimed /Priorité(s)
revendiquée(s)
Staat/ ~~Land/~~ ~~Land/~~ /State/Date/File no./Pays/Date/Numéro de dépôt:

Internationale Patentklassifikation/International Patent Classification/
Classification internationale des brevets:

H02M/

Am Anmeldetag benannte Vertragstaaten/Contracting states designated at date of
filling/Etats contractants désignées lors du dépôt:

AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IT LU MC NL
PT SE SI SK TR LI

BESCHREIBUNG

Digitaler Zustandsregler für Hochspannungserzeuger mit gemischemtem Modulationsverfahren

Die Erfindung betrifft eine Spannungsversorgungseinheit, insbesondere zur Hochspannungsversorgung, ein Röntgengerät mit einer Spannungsversorgungseinheit und ein Verfahren zur Regelung einer Spannungsversorgungseinheit.

Insbesondere im Hochspannungsbereich, bspw. als Spannungsversorgung für Röntgenröhren, werden Spannungsversorgungseinheiten eingesetzt, bei denen mittels einer Konverterschaltung eine Zwischenkreis-Gleichspannung in eine geschaltete Spannung umgeformt wird, bspw. in eine pulsweitenmodulierte (PWM) oder pulsfrequenzmodulierte (PFM) Spannung. Mit der geschalteten Spannung wird eine rezonante Schaltung gespeist, die einen Transformator aufweist. Sekundärseitig wird – ggf. nach Gleichrichtung und/oder Durchlauf einer Vervielfacherschaltung zur Spannungserhöhung – eine Ausgangsspannung abgegriffen. Eine hierbei entstehende Ausgangsspannung kann bspw. zur Versorgung einer Röntgenröhre verwendet werden.

Bei Hochspannungsgeneratoren ist es ein Ziel der Entwicklung, kleine und kompakte Generatoren bauen zu können. Um hierfür die Schaltvorrichtung kleiner und kompakter bauen zu können, ist eine Verringerung der Schaltverluste notwendig.

In der WO 01/37416 wird ein Ansteuerverfahren für eine Spannungsversorgungseinheit vorgeschlagen, bei dem verschiedene Betriebsmodi für niedrige, mittlere und hohe Ausgangsleistungen vorgesehen sind. Die Betriebsmodi unterscheiden sich hinsichtlich der Art der Ansteuerung der Schaltvorrichtung und damit hinsichtlich der gelieferten geschalteten Spannung. In einem ersten Betriebsmodus für niedrige Ausgangsleistungen erfolgt die Ansteuerung der Schaltvorrichtung nicht-resonant (d. h. unterhalb der halben Resonanzfrequenz der Schaltung) bei im wesentlichen fester Frequenz durch Variation des Tastverhältnisses (Pulsweitenmodulation, PWM).

In einem zweiten Betriebsmodus für mittlere Ausgangsleistungen erfolgt eine Regelung der Ausgangsleistung durch Änderung der Schaltfrequenz, wobei die Schaltfrequenz aber unterhalb der halben Resonanzfrequenz bleibt.

- 5 In einem dritten Betriebsmodus für hohe Ausgangsleistungen schließlich liegt die Schaltfrequenz oberhalb der halben Resonanzfrequenz. Bei maximaler Ausgangsleistung liegt ein vollresonanter Betrieb vor. Auch hier wird die Ausgangsleistung durch Änderung der Schaltfrequenz (PFM) eingestellt.
- 10 Diese Art der Ansteuerung wird als Mixed-Mode-Modulation bezeichnet. Es hat sich herausgestellt, dass sich hierdurch insgesamt die Schaltverluste deutlich verringern lassen.
- 15 Insbesondere in Röntgen-Anwendungen werden an die Regelung der Ausgangsspannung hohe Anforderungen gestellt. So ist eine möglichst kurze Anstiegszeit und ein möglichst geringes Überschwingen am Ende des Spannungshochlaufs erstrebenswert, um rasch den eingeschwungenen Zustand zu erreichen und eine unerwünscht hohe Strahlendosis für den Patienten zu vermeiden.
- 20 In der EP 1 081 839 ist ein serienresonanter Konverter, insbesondere zur Verwendung für Röntgengeräte, mit einer Regelschaltung beschrieben. Die Regelschaltung ist als digitale Regelschaltung mit einer Regelung im Zustandsraum ausgebildet. Außer der Ausgangsspannung wird als Regelgröße die Spannung über die Resonanzkapazität verarbeitet. Um eine Zerstörung von Bauelementen durch Überlastung auszuschließen,
25 wird diese Regelgröße einer Begrenzungsfunktion unterworfen.

Während die in der EP 1 081 839 beschriebene Regelstrategie bei herkömmlichen Schaltvorrichtungen gute Ergebnisse zeigt, ergeben sich Probleme bei stark nicht-linearen Regelstrecken. Eine mit Mixed-Mode-Modulation betriebene Spannungsversorgungseinheit stellt ein Beispiel einer solchen nicht-linearen Regelstrecke dar.

Es ist Aufgabe der Erfindung, eine Spannungsversorgungseinheit mit einer Regeleinrichtung und ein Verfahren zur Regelung einer Spannungsversorgungseinheit anzugeben, wobei eine gute Regelung auch bei stark nicht-linearen Verhalten erzielt werden soll. Weiter ist es Aufgabe der Erfindung, ein Röntgengerät mit einer solchermaßen
5 geregelten Spannungsversorgungseinheit anzugeben.

Diese Aufgabe wird gelöst durch eine Spannungsversorgungseinheit nach Anspruch 1, ein Röntgengerät nach Anspruch 10 und ein Verfahren nach Anspruch 11. Abhängige Ansprüche beziehen sich auf vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung.

10

Die Spannungsversorgungseinheit umfasst eine Schaltvorrichtung, bspw. eine Halb- oder Vollbrücke. Hierdurch wird eine resonante Schaltung, bevorzugt mit einer Resonanzkapazität und einem Transformator, gespeist. Die Schaltvorrichtung ist steuerbar. Die Ansteuerung wird durch eine Regeleinrichtung vorgegeben.

15

Die erfindungsgemäße Regeleinrichtung ist bevorzugt als digitale Regeleinrichtung ausgebildet. Es wird mindestens eine Stellgröße berechnet. Bevorzugt wird eine skalare Stellgröße berechnet, aus der sich die Ansteuerung für die Schaltvorrichtung, d. h. Schaltfrequenz und Pulsbreite bzw. Tastverhältnis der zu erzeugenden geschalteten
20 Spannung eindeutig ermitteln lassen.

Die erfindungsgemäße Regeleinrichtung verarbeitet als ersten Istwert einen Wert, der von der Ausgangsspannung abhängt. Zusätzlich kann ein zweiter Istwert verarbeitet werden, der von dem durch die Resonanzkreiselemente fließenden Strom abhängt. Bevorzugt ist dies die Spannung über einer Resonanzkapazität. Die Istwerte werden gemäß der jeweils gewählten Reglerstruktur zur Berechnung der Stellgröße verknüpft. Hierbei werden Reglerkoeffizienten verwendet, mit denen verarbeitete Größen multipliziert werden.
25

30

Die Besonderheit der erfindungsgemäßen Lösung liegt darin, dass einer oder mehrere, bevorzugt alle verwendeten Reglerkoeffizienten nicht konstant, sondern arbeitspunkt-abhängig veränderbar sind. Innerhalb der digitalen Regeleinrichtung können sie bspw. als Look up-Table realisiert sein, so dass sie in unterschiedlichen Betriebszuständen der

5 Spannungsversorgungseinheit unterschiedliche Werte annehmen.

Der jeweilige Arbeitspunkt kann durch die elektrische Größe der Spannungsversorgungseinheit oder durch eine Größe der Regelung gegeben sein, oder durch eine Kombination mehrerer Größen. Bevorzugt werden solche Größen, die ein Maß für die

10 gelieferte Leistung darstellen.

Damit eine Variation der Reglerkoeffizienten, die bspw. beim Wechsel zwischen verschiedenen Betriebsmodi bei Mixed-Mode-Modulation sehr starken Variationen unterworfen sein können, nicht zu einer unstetigen Änderung der Stellgröße führt, wird erfindungsgemäß ein differenziell arbeitender Regler vorgeschlagen. D. h., dass der Regler nicht Messwerte der Istwerte selbst verarbeitet, sondern zeitliche Änderungen derartiger Messwerte. Bei der vorgeschlagenen digitalen Regeleinrichtung werden so die Differenzen zwischen Abtastwerten zu verschiedenen, bevorzugt zu direkt aufeinanderfolgendenden Abtastzeitpunkten berechnet und bei der Berechnung der Stellgröße verwendet. Das differenzielle Prinzip ermöglicht eine stetige Ausgangsgröße trotz starker Variation der Reglerparameter.

20

Es hat sich gezeigt, dass mit einem derartigen Regler die hohen Anforderungen an eine geregelte Hochspannungsversorgung auch für Röntgenröhren erfüllt werden können,

25 trotz der Verwendung von Mixed-Mode-Modulation.

Bei der Regelung kann die Zwischenkreis-Spannung als konstant angenommen werden. Da diese aber, bspw. in Abhängigkeit von der Last, auch schwanken kann, wird zur Erzielung noch besserer Regeleigenschaften gemäß einer Weiterbildung der Erfindung vorgeschlagen, dass die Regeleinrichtung die Zwischenkreis-Spannung als zusätzliche Eingangsgröße verarbeitet. Innerhalb der Regeleinrichtung können dann eventuelle Abweichungen der Zwischenkreis-Spannung kompensiert werden.

30

Wie bereits erläutert sind bevorzugt einige oder alle Reglerkoeffizienten arbeitspunkt-abhängig. Sie können in entsprechenden Tabellen abgespeichert sein. Die Koeffizienten können berechnet werden, indem für jeden Arbeitspunkt ein vollständiger Reglerent-

5 wurf durchgeführt wird. Die jeweiligen Tabellen für die arbeitspunktabhängigen Reglerkoeffizienten können ein- oder mehrdimensional sein, d. h., dass der jeweilige Reglerkoeffizient von einer oder von mehreren Größen abhängig ist. Bevorzugt werden zweidimensionale Look up-Tables, in denen der jeweilige Reglerkoeffizient in Abhän-

10 gigkeit von einem Wertepaar aus zwei Indexgrößen angegeben ist. Bevorzugt wird hierbei, dass die erste Indexgröße von der durch den Regler berechneten Stellgröße abhängt, und die zweite Indexgröße von einem oder mehreren der verarbeiteten Istwerte. In einer bevorzugten Ausführungsform wird als erste Indexgröße eine zeitverzögerte Stellgröße und als zweite Indexgröße eine Differenz zwischen zwei verarbeiteten Istwerten, näm-

15 lich der Ausgangsspannung und der Spannung über der Resonanzkapazität verwendet.

15 Die bevorzugte Grundstruktur der Regeleinrichtung ist die eines differenziellen PI-
Brücke. In einer bevorzugten Ausführungsform werden die Regelabweichung sowie Differenzwerte der verarbeiteten Istwerte und ein rückgekoppelter, zeitverzögerter Differenzwert der Stellgröße jeweils mit Reglerkoeffizienten multipliziert und aufsum-

20 miert. Das Ergebnis wird wiederum zeitlich aufsummiert, um die Stellgröße zu berechnen. Von den Reglerkoeffizienten sind bevorzugt alle arbeitspunktabhängig veränderbar.

25 Gnäß einer Weiterbildung der Erfindung ist eine spezielle Regelung vorgesehen, mit deren Hilfe die Zerstörung von Bauteilen durch Überlastung verhindert wird. Bei einem seriengesonanten Konverter betrifft dies vor allem den Resonanzstrom, d. h. den Strom durch die Serienresonanzelemente. Durch Begrenzung dieses Stroms bzw. der Spannung an der Resonanzkapazität kann eine Überlastung verhindert werden. Für eine derartige Begrenzung enthält die Regeleinrichtung außer der ersten Reglereinheit zur Regelung der Ausgangsspannung eine zweite Reglereinheit, die eine zweite Stellgröße vor-
25 schreibt, die Spannung an der Resonanzkapazität auf einen Maximalwert zu regeln. Ü-
bersteigt die von der ersten Reglereinheit vorgegebene Stellgröße die von der zweiten

Reglereinheit vorgegebene Stellgröße, so wird die Stellgröße auf letzteren Wert limitiert.

Auf diese Weise wird eine dynamische Limitierung erreicht, die im normalen Betrieb
5 nicht in die eigentliche Regelung eingreift. Nur wenn durch die erste Reglereinheit eine Stellgröße vorgegeben wird, die zu einem kritischen Betriebszustand führen könnte, erfolgt eine Limitierung. Aufgrund dieser Limitierung kann insgesamt eine schnellere Anlaufzeit erreicht werden, da die erste Reglereinheit entsprechend ausgelegt werden kann, um die Bauelemente der Spannungsversorgungseinheit näher an ihrem Leistungs-
10 limit zu betreiben.

Gemäß einer Weiterbildung der Erfindung ist die Regeleinrichtung digital ausgebildet, bspw. mittels eines DSP, der ein entsprechendes Programm ausführt. Wenn bei hohen Resonanzfrequenzen die Timing-Intervalle hierbei zu kurz sind, um alle notwendigen
15 Berechnungen durchzuführen, kann vorgesehen werden, dass nur Messwerte eines Teils der Timing-Intervalle verarbeitet werden, bspw. die Messwerte während jedes zweiten, dritten usw. Timing-Intervalls.

Nachfolgend wird ein Ausführungsbeispiel der Erfindung anhand von Zeichnungen
20 näher beschrieben. In den Zeichnungen zeigen:

- Fig. 1 ein schematisches Schaltbild einer Hochspannungsversorgungseinheit für eine Röntgenröhre;
- Fig. 2 ein Schaltbild einer Schaltvorrichtung;
- 25 Fig. 3 ein Ersatzschaltbild eines resonanten Konverters;
- Fig. 4a-4c schematische Darstellung des Zeitverlaufs einer geschalteten Spannung und eines Resonanzstroms in einem ersten, zweiten und dritten Betriebsmodus;
- Fig. 5 eine Darstellung des Zeitverlaufs von Strömen und Spannungen in
30 Fig. 3;
- Fig. 6 ein Diagramm mit der gegenseitigen Abhängigkeit der Größen T_W , T_P und T_{PW} ;

Fig. 7 eine schematische Darstellung einer Spannungsversorgungseinheit mit Regelung;

Fig. 8 ein Reglerdiagramm eines PI-Reglers;

Fig. 9 ein Reglerdiagramm eines differenziellen PI-Reglers;

5 Fig. 10 ein Reglerdiagramm einer Regeleinrichtung mit zwei Regeleinheiten;

Fig. 11 ein Reglerdiagramm mit einem differenziellen PI-Regler mit arbeitspunktabhängigen Reglerkoeffizienten und Zwischenkreisspannungskompensation;

Fig. 12 ein Reglerdiagramm einer Ausführungsform einer vollständigen Regeleinrichtung.

10

In Fig. 1 ist eine Spannungsversorgungseinheit 10 für eine Röntgenröhre 12 dargestellt. Eine Wechselspannungsversorgung 14 – bspw. ein Anschluss an das Spannungsversorgungsnetz – liefert nach Gleichrichtung durch eine Gleichrichter-Einheit 16 eine Zwischenkreisspannung U_Z , mit der eine Schalteinheit 18 versorgt wird. Die Schalteinheit 18 formt die Zwischenkreis-Gleichspannung U_Z um in eine geschaltete Spannung, mit der eine resonante Schaltung 20 mit einer Serienkapazität C und einem Transformator T gespeist wird. Sekundärseitig des Transformators T wird über eine an sich bekannte Vervielfacher-Schaltung 22 eine Ausgangsspannung erzeugt, mit der die Röntgenröhre 20 12 gespeist wird.

Fig. 2 zeigt ein Schaltbild der Schaltvorrichtung 18. Im dargestellten Beispiel handelt es sich um eine Vollbrückenschaltung, bei der mit vier gesteuerten Schaltern S1, S2, S3, S4 die Eingangsgleichspannung U_Z in eine geschaltete Ausgangsspannung U_{WR} umgeformt wird. Den Schaltern S1, S2, S3, S4 sind jeweils antiparallele Dioden D1, D2, D3, D4 zugeordnet. Der zwischen den Halbbrücken fließende Strom wird mit I bezeichnet.

Wie in Fig. 1 angedeutet umfasst die durch die Schalteinheit 18 gespeiste resonante Schaltung eine Serienkapazität C und einen Transformator T. Unter der Annahme einiger Vereinfachungen (Ersetzung der Vervielfacher-Schaltung 22 durch einen Brücken-gleichrichter 24 und einen idealen Transformator mit einem konstanten Übersetzungs-

verhältnis, unendlich hohe Hauptinduktivität des Transformators T, Vernachlässigung von Verlusten bei der Gleichrichtung und Vernachlässigung der parasitären Kapazität des Transformators T) sowie der Transformation aller elektrischen Größen auf die Primärseite des Transformators T, ergibt sich das in Fig. 3 dargestellte Ersatzschaltbild.

- 5 Die Spannung über die Resonanzkapazität C wird mit u_C bezeichnet. Die Streuinduktivität des Transformators T wird mit L bezeichnet, die Spannung hierüber ist u_L . Der ohmsche Verlust des Transformators T wird durch den Widerstand R repräsentiert. An dem idealen Gleichrichter 24 liegt die Wechselspannung u_{GR} an, woraus die Spannung u_{out} erzeugt wird, die eine Lastkapazität C_g und einen
- 10 Lastwiderstand R_L speist, welche die Röhre 12 repräsentieren.

Die Spannungsversorgungseinheit 10 wird mit Mixed-Mode-Modulation betrieben, wie sie in der WO 01/37416 beschrieben ist. Der Inhalt dieser Schrift wird bezüglich dieses Ansteuerverfahrens vollständig einbezogen. Bei der verwendeten Mixed-Mode-

- 15 Modulation werden drei verschiedene Betriebsmodi mit verschiedener Ansteuerung unterschieden. Diese drei Betriebsmodi sollen nachfolgend im Hinblick auf die Fig. 4a, 4b und 4c beschrieben werden:

- 20 In einem ersten Betriebsmodus erfolgt eine Ansteuerung der Schaltvorrichtung 18 so, dass die gelieferte geschaltete Spannung U_{WR} eine pulsweitenmodulierte Spannung ist. Es wird eine geringe, feste Schaltfrequenz verwendet. Fig. 4a zeigt für diesen ersten Betriebsmodus den Verlauf des Stroms I und die Ansteuerung der Schalter S1, S2, S3, S4 anhand einer Schaltgröße S (bei $S=1$ sind S1, S4 ein und S2, S3 aus; bei $S=0$ sind alle Schalter aus; bei $S=-1$ sind S2, S3 an und S1, S4 aus). Die Regelung erfolgt durch
- 25 Variation des Tastgrades. Der erste Betriebsmodus wird für niedrige Ausgangsleistung verwendet.

- 30 Im zweiten Betriebsmodus ist der Tastgrad konstant auf dem Maximum, d. h. der halben Resonanzperiode. Die Schaltfrequenz ist zwischen der im ersten Betriebsmodus verwendeten geringen Frequenz und der halben Resonanzfrequenz der Schaltung 20 variabel. Fig. 4b zeigt den Stromverlauf bei dieser Ansteuerung. Mittels Pulsfrequenz-

modulation (PFM) wird die Ausgangsleistung eingestellt. Der zweite Betriebsmodus wird für mittlere Ausgangsleistungen verwendet.

Im dritten Betriebsmodus erfolgt der Betrieb der Schaltung 20 resonant. Die Schaltfrequenz ist variabel oberhalb der halben Resonanzfrequenz der Schaltung 20. Die Pulsbreite ergibt sich aus dem Nulldurchgang des Resonanzstroms. Mit dem Nulldurchgang wird der aktive Puls beendet. In Fig. 4c ist der entsprechende Zeitverlauf der elektrischen Größen dargestellt. Mittels Pulsfrequenzmodulation wird unter Ausnutzung der Resonanzüberhöhung die Ausgangsleistung eingestellt. Der dritte Betriebsmodus wird für den Betrieb bei hohen Ausgangsleistungen verwendet.

In Fig. 5 ist der Zeitverlauf der Größen $u_C(t)$, u_{WR} und $i(t)$ dargestellt. Anhand dieses Diagramms sollen einige Größen definiert werden. Ein Timing-Intervall beginnt mit einem Nulldurchgang des Stromes ("Detect Zero"-Ereignis). Nach einer Zeit T_W beginnt eine aktive Phase, in der die positive (S1, S4) oder die negative (S2, S3) Diagonale der Vollbrücke 18 aktiviert wird. Die aktive Phase dauert in einem Intervall T_P an bzw. wird durch den Stromnulldurchgang beendet. Danach werden alle Schalter abgeschaltet. Beim nächsten Nulldurchgang beginnt ein neues Timing-Intervall mit der entgegengesetzten aktiven Phase. Die Werte T_W und T_P werden durch die Regeleinrichtung vorgegeben. Zur einfacheren Handhabung werden T_W und T_P auf die (bekannte) halbe Resonanzfrequenz der resonanten Schaltung 20 normiert. Die drei Betriebsmodi können hinsichtlich T_W und T_P dann wie folgt charakterisiert werden:

25	Low Power:	$T_W = T_{W,\max};$	$0 < T_P < 1$
	Medium Power:	$1 < T_W < T_{W,\max};$	$T_P = 1$
	High Power:	$0 < T_W < 1;$	$T_P = 1.$

Hierdurch ist es möglich, einen skalaren Wert T_{PW} zu definieren, durch den die Werte T_P und T_W jeweils festgelegt sind. Fig. 6 zeigt die nicht-lineare Beziehung zwischen T_P , T_W und T_{PW} .

In Fig. 7 ist in einer symbolischen Darstellung gezeigt, wie die Spannungsversorgungs-

einrichtung 10 geregelt wird. Die Spannung U_C an der Resonanzkapazität und die Ausgangsspannung U_{out} werden gemessen, abgetastet und einem Regler 30 zugeführt. Der Regler 30 gibt als Stellgröße einen Wert T_{PW} vor, der in einem Treiber 32 zunächst in die Werte T_w und T_p und dann in entsprechende Ansteuerung für die Schalter S1, S2,

5 S3, S4 umgesetzt wird. Zusätzlich verarbeitet der Regler 30 auch abgetastete Messwerte der Zwischenkreisspannung U_Z , um eventuelle Schwankungen dieser Zwischenkreisspannung zu kompensieren.

Die Funktionsblöcke Regler 30 und Ansteuerung 32 aus Fig. 7 können ganz oder zum Teil als Software-Lösungen realisiert werden. Bevorzugt wird eine DSP-Implementierung. Bei der Durchführung der Berechnungen stehen im High-Power Betriebsmodus nur geringe Zeitdauern von weniger als der Resonanzperiode zur Verfügung. Wenn die Resonanzfrequenz des geregelten Systems hoch und damit die Resonanzperiode kurz ist und diese zeitlichen Randbedingungen für die Durchführung der notwendigen Berechnungen zu knapp bemessen sind, kann eine Implementation gewählt werden, bei der nur bei jedem zweiten "Detect Zero"-Ereignis die Messungen durchgeführt werden. In der zur Verfügung stehenden Zeit werden die Messwerte digitalisiert und die Berechnungen zur Ermittlung der Stellgröße T_{PW} durchgeführt.

10 15 20 25 30

Die durch den DSP realisierte Reglerstruktur ist eine digitale Zustandsraum-Regelung. Fig. 12 zeigt in einem Reglerdiagramm die gesamte Struktur des Reglers 30. Bevor jedoch auf die Details der Realisierung nach Fig. 12 eingegangen wird, sollen zunächst Teile hiervon einzeln erläutert werden.

Fig. 8 zeigt zunächst die PI-Grundstruktur des verwendeten Reglers. Bearbeitet werden Istwerte U_{out} und $U_L = U_C - U_{out}$. Die Ausgangsspannung U_{out} soll auf einen Sollwert U_{soll} geregelt werden. Die verarbeiteten Istwerte U_{out} , U_L werden mit Reglerkoeffizienten k_{out} , k_L multipliziert. Die Regelabweichung $U_{soll} - U_{out}$ wird mit einem Reglerkoeffizienten k_I multipliziert und zeitlich aufsummiert, was einer diskreten Integration entspricht. Der um eine Zeiteinheit verzögerte Wert der Stellgröße $T_{PW, reg}$ wird multipliziert mit dem Reglerkoeffizienten k_E . Die jeweils mit den Reglerkoeffizienten k_{out} , k_L , k_I ,

k_E multiplizierten Größen werden mit Vorzeichen wie in Fig. 8 gezeigt aufsummiert und einer Begrenzungsfunktion unterworfen, um die Stellgröße $T_{PW, reg}$ zu bilden.

Die Reglerkoeffizienten k_{out} , k_L , k_I , k_E in Fig. 8 sind jedoch im Allgemeinen nicht konstant. Sie hängen vielmehr vom jeweiligen Arbeitspunkt der Stromversorgungseinheit 10 ab. Als Indexgrößen für den Arbeitspunkt werden die Größe U_L , ggf. noch bereinigt um eine Kompensation von Schwankungen der Zwischenkreisspannung U_Z , wie unten erläutert, und die Regelgröße $T_{PW, reg, old}$ des vorangegangenen Berechnungsintervalls verwendet.

10

Bei der Berechnung von $T_{PW, reg}$ der Reglerstruktur aus Fig. 8 wird jeweils bei der aktuellen Berechnung ein dem derzeitigen Arbeitspunkt entsprechender Satz von Reglerkoeffizienten k_{out} , k_L , k_I , k_E verwendet. Die jeweiligen Werte für jeden dieser Koeffizienten sind in einem zweidimensionalen Look up-Table abgespeichert, wo für eine Anzahl 15 von Wertepaaren der Indexgrößen U_L und $T_{pw, old}$ die jeweiligen Werte für k_{out} , k_L , k_I abgespeichert sind. Für einen bestimmten, aktuellen Arbeitspunkt, d. h. aktuelle Werte für U_L und $T_{PW, old}$ wird aus diesen Look up-Tables zunächst das nächstkommen- 20 de Paar dieser Indexgrößen ermittelt und dann der zugehörige, abgespeicherte Wert für den jeweiligen Reglerkoeffizienten verwendet. Alternativ zur Auswahl des nächstliegenden Paars wäre es auch möglich, den jeweiligen Wert des Reglerkoeffizienten geeignet zu interpolieren, wenn ausreichend Rechenzeit hierzu zur Verfügung steht.

Um die Look up-Tables mit den entsprechenden Vorgaben für die Koeffizienten k_{out} , k_L , k_I , k_E zu Index-Wertepaaren U_L , $T_{PW, old}$ zu füllen, ist für jeden Arbeitspunkt ein vollständiger Reglerentwurf notwendig.

Zur Bestimmung der Reglerparameter kann das folgende Modell verwendet werden. U_{out} und U_C sind abgetastete Zustände, welche zum Stromnulldurchgang des Resonanzstromes 30 den jeweiligen Messgrößen abgeleitet werden. Das dynamische Verhalten dieser Größen wird durch das Zustandsmodell

$$\begin{pmatrix} U_L \\ U_{out} \end{pmatrix}_{k+1} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} U_L \\ U_{out} \end{pmatrix}_k + \mathbf{b} E(U_{L,k}, T_{PW,k})$$

beschrieben, wobei die Zustandsgröße U_L eine zusammengesetzte Größe

5

$$U_{L,k} = U_{C,k} - U_{out,k}$$

ist. \mathbf{A} und \mathbf{b} stellen Systemmatrizen dar, welche von Parametern der Spannungsversor-
gungseinheit 10 abhängen. Die nicht-lineare Funktion E hängt von der Zustandsgröße

10 U_L und der Steuergröße T_{PW} ab. Sie ist durch die Konverterparameter und das Steuer-
verfahren eindeutig festgelegt.

Zur Durchführung des Reglerentwurfes wird die nicht-lineare Funktion in einem Ar-
beitspunkt (U_{L0}, T_{PW0}) linearisiert. Das resultierende lineare Modell wird um zwei zu-
15 sätzliche Zustände erweitert. Der Zustand Σ stellt die Summe über die Regelabwe-
chung dar und wird zur Modellierung des Integralanteils verwendet, während der Zu-
stand T_{PWsys} zur Modellierung eines digitalen Delays zwischen Berechnung und Auf-
schaltung eines neuen Stellwertes T_{PW} dient. Dies führt auf ein erweitertes Systemmo-
dell

20

$$\begin{pmatrix} U_L \\ U_{out} \\ \Sigma \\ T_{PWsys} \end{pmatrix}_{k+1} = \begin{pmatrix} A & 0 & b \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_L \\ U_{out} \\ \Sigma \\ T_{PWsys} \end{pmatrix}_k + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} T_{PW} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} U_{soll}.$$

Nach der Methode der Polplatzierung - d.h. einem Entwurf durch Eigenwertvorgabe bzw.
Polvorgabe (siehe beispielsweise O. Föllinger, "Lineare Abtastsysteme", R. Oldenburg Ver-
lag, 1982, Kapitel 7.6) - lassen sich die Parameter eines Zustandsreglers

25

$$T_{PW} = -(k_L \ k_{out} \ k_I \ k_e) \begin{pmatrix} U_L \\ U_{out} \\ \Sigma \\ T_{PW_{sys}} \end{pmatrix}$$

bestimmen. Es wird vorausgesetzt, dass in vorhergehenden Schritten zunächst die gewünschten dynamischen Eigenschaften des Systems wie Anstiegszeit, maximales Überschwingen, usw. vorgegeben werden, und aus diesen Vorgaben korrespondierende Eigenwerte der Systemmatrix bestimmt werden. Wenn ein Überschwingen des Systems

5 gänzlich vermieden werden soll, was häufig der Fall ist, bedingt dies rein reelle Eigenwerte ohne Imaginärteil.

Der oben beschriebene Entwurf wird für alle möglichen Kombinationen von Werten $U_{L,1}$
 10 bis $U_{L,n}$, sowie $T_{PW,1}$ bis $T_{PW,m}$ durchgeführt. Die erhaltenen Reglerparameter werden in die verschiedene Tabellen geschrieben, die vom DSP arbeitspunktabhängig ausgewertet werden.

In dem Regler 30 wird aber die grundlegende PI-Reglerstruktur wie in Fig. 8 dargestellt
 15 nicht direkt verwendet. Sondern diese Struktur wird wie in Fig. 9 dargestellt um eine differenzielle Komponente erweitert. Hierbei werden von den Istwerten U_{out} und U_L sowie von der rückgeführten Stellgröße $T_{PW,reg}$ nicht die Werte an sich, sondern Differenzwerte des aktuellen Abtastwertes zum vorhergehenden Abtastwert verwendet. Entsprechende Differenz-Einheiten Δ sind in Fig. 9 zusätzlich zur Grundstruktur (Fig. 8)
 20 eingefügt. Durch die Verlegung der zeitlichen Summation Σ hinter den Summationspunkt wird hieraus wieder die Stellgröße $T_{PW,reg}$ berechnet. Der Vorteil der differenziellen Struktur aus Fig. 9 gegenüber der Grundstruktur aus Fig. 8 ist, dass die arbeitspunktabhängigen Änderungen der Reglerparameter ihre Auswirkungen zunächst in der differenziellen Domäne haben. Durch die anschließende zeitliche Summation (diskrete
 25 Integration) ist eine stetige Änderung der Stellgröße $T_{PW,reg}$ somit auch bei Änderungen der Parameter k_{out} , k_L , k_I , k_E gewährleistet.

Fig. 10 zeigt zwei Reglereinheiten 34, 36. Die in Fig. 10 links dargestellte Reglereinheit 34 entspricht der Darstellung in Fig. 9 und dient dazu, die Ausgangsspannung U_{out} auf den Sollwert U_{soll} zu regeln.

5

Die in Fig. 10 rechts dargestellte Reglereinheit 36 weist dieselbe Struktur wie die Reglereinheit 34 auf. Allerdings sind in dem gezeigten Beispiel die Reglerparameter k_L, l , k_{out}, l , k_L, I und k_E, I hier nicht arbeitspunktabhängig (in einer alternativen Ausführungsform können auch diese Parameter arbeitspunktabhängig sein). Die Regelabweichung

- 10 wird gebildet aus dem Istwert der Spannung über die Resonanzkapazität u_C und einem fest eingestellten zulässigen Maximalwert $U_{C, max}$ für diese Spannung. Der Wert $U_{C, max}$ entspricht einem Wert für die Spannung an dieser Kapazität, bei dem Beschädigungen aufgrund einer Überlastung der Schaltung 20 ausgeschlossen sind. Die Reglereinheit 36 liefert eine Stellgröße ΔT_{PW} (noch in der differenziellen Domäne), durch die eine
- 15 Ansteuerung so erfolgt, dass die Spannung U_C auf den zulässigen Maximalwert $U_{C, max}$ geregelt wird.

Die Verknüpfung der beiden Reglereinheiten 34, 36 erfolgt über eine Begrenzungsfunktion. Die durch die linke Reglereinheit 34 gelieferte Stellgröße ΔT_{PW} wird (nach zeitlicher Summation) für die Ansteuerung verwendet, solange sie nicht den durch die rechte Reglereinheit 36 vorgegebenen Wert übersteigt. Die Reglereinheit 36 tritt im normalen Betrieb nicht in Erscheinung. Erst wenn zu hohe Werte ΔT_{PW} vorgegeben werden, limitiert die Reglereinheit 36 ΔT_{PW} auf den jeweils dynamisch ermittelten Maximalwert, bei dem noch ein zulässiges U_C erreicht wird.

25

Fig. 11 zeigt eine zusätzliche Erweiterung der Reglerstruktur aus Fig. 9. Hier wird ein Messwert für die Zwischenkreisspannung U_z unter Verwendung eines zusätzlichen Reglerkoeffizienten k_z verarbeitet. In den Funktionsblöcken $\frac{U_{nenn}}{U_z}$ wird jeweils mit einem Normierungsfaktor multipliziert, der gleich Eins ist, wenn U_z dem Nennwert von U_{nenn} entspricht.

Die Reglerkoeffizienten k_{out} , k_L , k_I , k_E , k_Z sind arbeitspunktabhängig. In Fig. 11 ist durch Pfeile dargestellt, wie die Look up-Tables durch die Indexgrößen $T_{PW, reg, old}$ und U_L (normiert auf $\frac{U_{nenn}}{U_z}$) angesteuert werden.

5

Die oben im Zusammenhang mit den Fig. 8-11 erläuterten Bausteine werden zu dem in Fig. 12 dargestellten vollständigen Regler 30 zusammengefügt. In Fig. 12 links dargestellt ist ein Regler 40 für die Ausgangsspannung (vgl. Fig. 11). Rechts ist ein Regler 50 vorgesehen zur Begrenzung der Stellgröße T_{PW} auf einen Wert, der zu einem zulässigen Spannungswert U_C führt (vgl. Fig. 10 und die zugehörigen Erläuterungen).

Durch die Einheit 32 schließlich werden mit Hilfe der in Fig. 6 dargestellten Beziehung aus dem Wert T_{PW} die Größen T_w und T_p abgeleitet.

15 Durch Simulation und anschließende praktische Überprüfung konnte gezeigt werden, dass mit der dargestellten Reglerstruktur eine hochgenaue Regelung bei Mixed-Mode-Modulation erzielt werden kann.

20

PATENTANSPRÜCHE

1. Spannungsversorgungseinheit mit

- einer Schaltvorrichtung (18) zur Umformung einer Zwischenkreisspannung (U_Z) in eine geschaltete Spannung (U_{WR}),
- und einer durch die geschaltete Spannung (U_{WR}) gespeisten resonanten Schaltung (20) mit einem Transformator (T) zur Lieferung einer Ausgangsspannung,
- und mit einer Regeleinrichtung (30, 32) zur Vorgabe mindestens einer Stellgröße (T_{PW}) für die Ansteuerung der Schaltvorrichtung (18),
- wobei die Regeleinrichtung (30, 32) Abtastwerte mindestens eines ersten Istwerts (U_{out}) verarbeitet, der von der Ausgangsspannung abhängt, und von dem aus zwei Abtastwerten ein zeitlicher Differenzwert (ΔU_{out}) berechnet wird,
- wobei der Differenzwert (ΔU_{out}) mit einem ersten Reglerkoeffizienten (k_{out}) multipliziert und das Ergebnis bei der Berechnung der Stellgröße (T_{PW}) verwendet wird,
- und wobei der Wert des ersten Reglerkoeffizienten (k_{out}) in Abhängigkeit vom Arbeitspunkt der Spannungsversorgungseinheit veränderbar ist.

2. Spannungsversorgungseinheit nach Anspruch 1, bei der

- bei der Berechnung der Stellgröße (T_{PW}) ein zweiter Istwert (U_L) verarbeitet wird, der von dem Strom durch die rezonante Schaltung (20) abhängt,
- wobei aus Abtastwerten des zweiten Istwerts (U_L) ein zeitlicher Differenzwert (ΔU_L) berechnet und mit einem zweiten Reglerkoeffizienten (k_L) multipliziert wird,
- wobei der Wert des zweiten Reglerkoeffizienten (k_L) in Abhängigkeit vom Arbeitspunkt der Spannungsversorgungseinheit (10) veränderbar ist.

3. Spannungsversorgungseinheit nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei der

- die Regeleinrichtung (30, 32) als dritten Istwert die Zwischenkreisspannung (U_Z) verarbeitet,

5 - wobei die Verarbeitung bevorzugt erfolgt, indem ein Differenzwert der Zwischenkreisspannung (ΔU_Z) mit einem Reglerkoeffizienten (k_Z) multipliziert und zu anderen Größen addiert wird und das Ergebnis zeitlich aufsummiert wird,

- wobei der Reglerkoeffizient (k_Z) bevorzugt in Abhängigkeit vom Arbeitspunkt der Spannungsversorgungseinheit (10) veränderbar ist.

10

4. Spannungsversorgungseinheit nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei der

- die Regeleinrichtung (30, 32) eine Struktur hat, bei der
- die Regelabweichung, Differenzwerte (ΔU_{out} , ΔU_L) von Istwerten und ein rückgekoppelter, zeitverzögter Differenzwert der Stellgröße (T_{PW}) jeweils mit Reglerkoeffizienten (k_I , k_{out} , k_L , k_E) multipliziert und aufaddiert werden,

15 - und das Ergebnis zeitlich aufsummiert wird,

- wobei einer, mehrere oder alle Reglerkoeffizienten (k_I , k_{out} , k_L , k_E) in Abhängigkeit vom Arbeitspunkt der Spannungsversorgungseinheit (10) veränderbar sind.

20 5. Spannungsversorgungseinheit nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei der

- der oder die arbeitspunktabhängigen Reglerkoeffizienten (k_{out} , k_L , k_E , k_I , k_Z) aus zweidimensionalen Tabellen entnommen werden,
- wobei in jeder Tabelle jeweils für Wertepaare einer ersten Indexgröße, die von der Stellgröße (T_{PW}) abhängt,

25 - und einer zweiten Indexgröße, die von einem oder mehreren der verarbeiteten Istwerte (U_L) abhängt,

- der jeweilige Wert des Reglerkoeffizienten (k_{out} , k_L , k_I , k_E , k_Z) enthalten ist.

6. Spannungsversorgungseinheit nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei der

- die Regeleinrichtung (30, 32) eine skalare Stellgröße (T_{PW}) liefert,
- aus der eine Vorgabe für die Ansteuerung der Schaltvorrichtung (18) zur Erzeugung der geschalteten Spannung (U_{WR}) berechnet wird.

5
7. Spannungsversorgungseinheit nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei der

- in einem ersten Betriebsmodus für niedrige Ausgangsleistungen eine Ansteuerung der Schaltvorrichtung (18) erfolgt, indem bei im wesentlichen konstanter Schaltfrequenz, die mindestens um einen vorbestimmten Faktor geringer ist als die Resonanzfrequenz, die Pulsbreite verändert wird,
- und in einem zweiten Betriebsmodus für höhere Ausgangsleistungen eine Ansteuerung der Schaltvorrichtung (18) erfolgt, bei der die Schaltfrequenz im Bereich der Resonanzfrequenz variiert.

10
15

8. Spannungsversorgungseinheit nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei der

- die Regeleinrichtung (30, 32) mindestens eine erste Reglereinheit (34) und eine zweite Reglereinheit (36) umfasst,
- wobei die erste Reglereinheit (34) eine erste Stellgröße vorgibt, um mindestens einen Istwert (U_{out}) auf einen Sollwert (U_{soll}) zu regeln,
- und die zweite Reglereinheit (36) eine zweite Stellgröße vorgibt, um eine elektrische Größe der resonanten Schaltung (20) auf einen zulässigen Maximalwert zu regeln,
- wobei jeweils die geringere der beiden Stellgrößen für die Ansteuerung verwendet wird.

20
25

9. Spannungsversorgungseinheit nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei der

- die Regeleinrichtung als digitale Regeleinrichtung mit einer Zentraleinheit realisiert ist,
- wobei Messwerte mindestens eines ersten Istwerts (U_{out}) digitalisiert werden und mindestens eine Stellgröße (T_{PW}) berechnet wird, um eine geschaltete Spannung mit einem Timing-Intervall zu liefern,
- wobei Messwerte nur eines Teils der Timing-Intervalle verarbeitet werden.

5 10. Röntgengerät mit

10 - einem Netzteil (14, 16) zur Lieferung einer Zwischenkreisspannung (U_Z),
- einer Spannungsversorgungseinheit (10) nach einem der vorangehenden Ansprüche, die durch die Zwischenkreisspannung (U_Z) versorgt wird,
- und einer Röntgenröhre (12), die durch die Ausgangsspannung der Spannungsversorgungseinheit (10) gespeist ist.

15

11. Verfahren zur Regelung einer Spannungsversorgungseinheit (10) mit einer Schaltvorrichtung (18) zur Umformung einer Zwischenkreisspannung (U_Z) in eine geschaltete Spannung (U_{WR}) und einer durch die geschaltete Spannung (U_{WR}) gespeisten resonanten Schaltung (20) mit einem Transistor (T), und ggf. einer Gleichrichterschaltung, zur Lieferung einer Ausgangsspannung, bei dem zur Bildung einer Stellgröße (T_{PW}) zur Ansteuerung der Schaltvorrichtung

20 - aus Abtastwerten eines ersten Istwerts (U_{out}) ein zeitlicher Differenzwert (ΔU_{out}) berechnet und mit einem ersten Reglerkoeffizienten (k_{out}) multipliziert wird,
- wobei der Wert des ersten Reglerkoeffizienten (k_{out}) in Abhängigkeit vom Arbeitspunkt der Spannungsversorgungseinheit (10) veränderbar ist.

25

ZUSAMMENFASSUNG

Digitaler Zustandsregler für Hochspannungserzeuger mit gemischem Modulationsverfahren

Eine Spannungsversorgungseinheit, ein Röntgengerät mit einer Spannungsversorgungseinheit und ein Verfahren zur Regelung einer Spannungsversorgungseinheit werden erläutert. Zur Regelung auch nicht-linearer Regelstrecken, wie einer mit Mixed-Mode-Modulation betriebenen Spannungsversorgungseinheit, wird vorgeschlagen, dass die Regeleinrichtung als digitale Regeleinrichtung ausgebildet ist, die mindestens eine Stellgröße berechnet. Die Regeleinrichtung verarbeitet mindestens einen ersten Istwert

5 U_{out} , der von der Ausgangsspannung abhängt. Aus zwei Abtastwerten des ersten Istwerts U_{out} wird ein zeitlicher Differenzwert berechnet und mit einem ersten Reglerkoeffizienten k_{out} multipliziert. Der Wert des ersten Reglerkoeffizienten ist hierbei in Abhängigkeit vom Arbeitspunkt der Spannungsversorgungseinheit veränderbar.

10

15 Fig. 8

Fig. 1

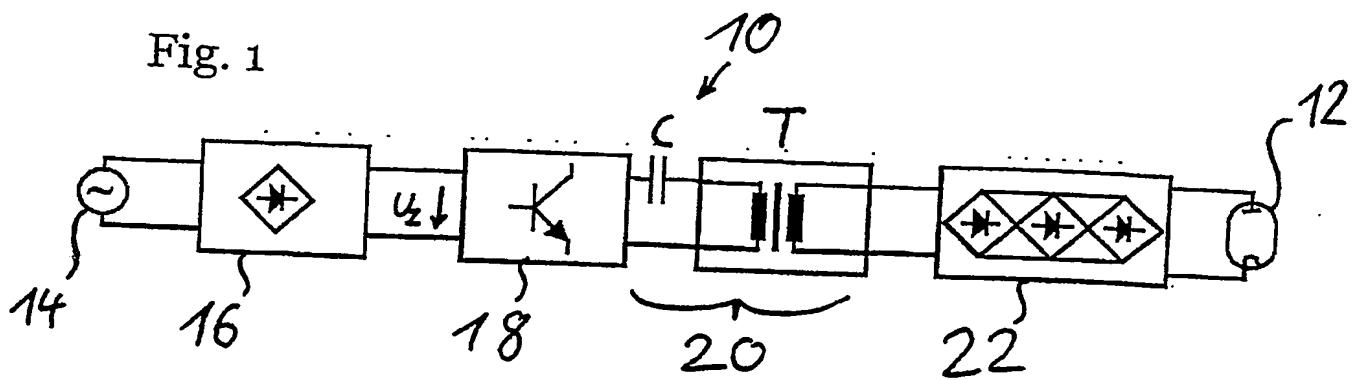


Fig. 2

18 ↘

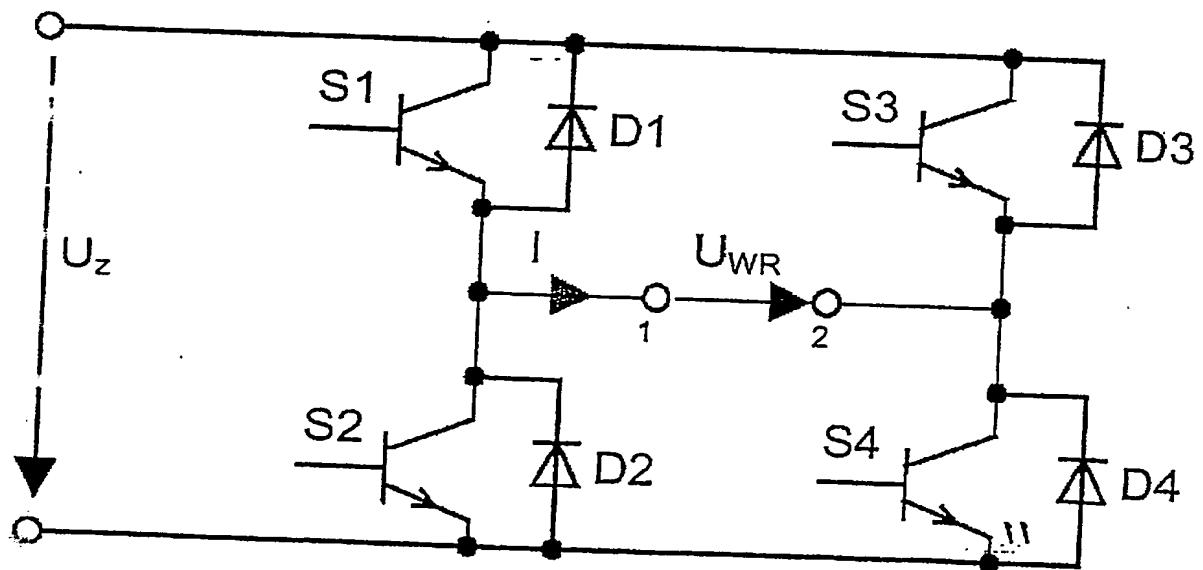


Fig. 3

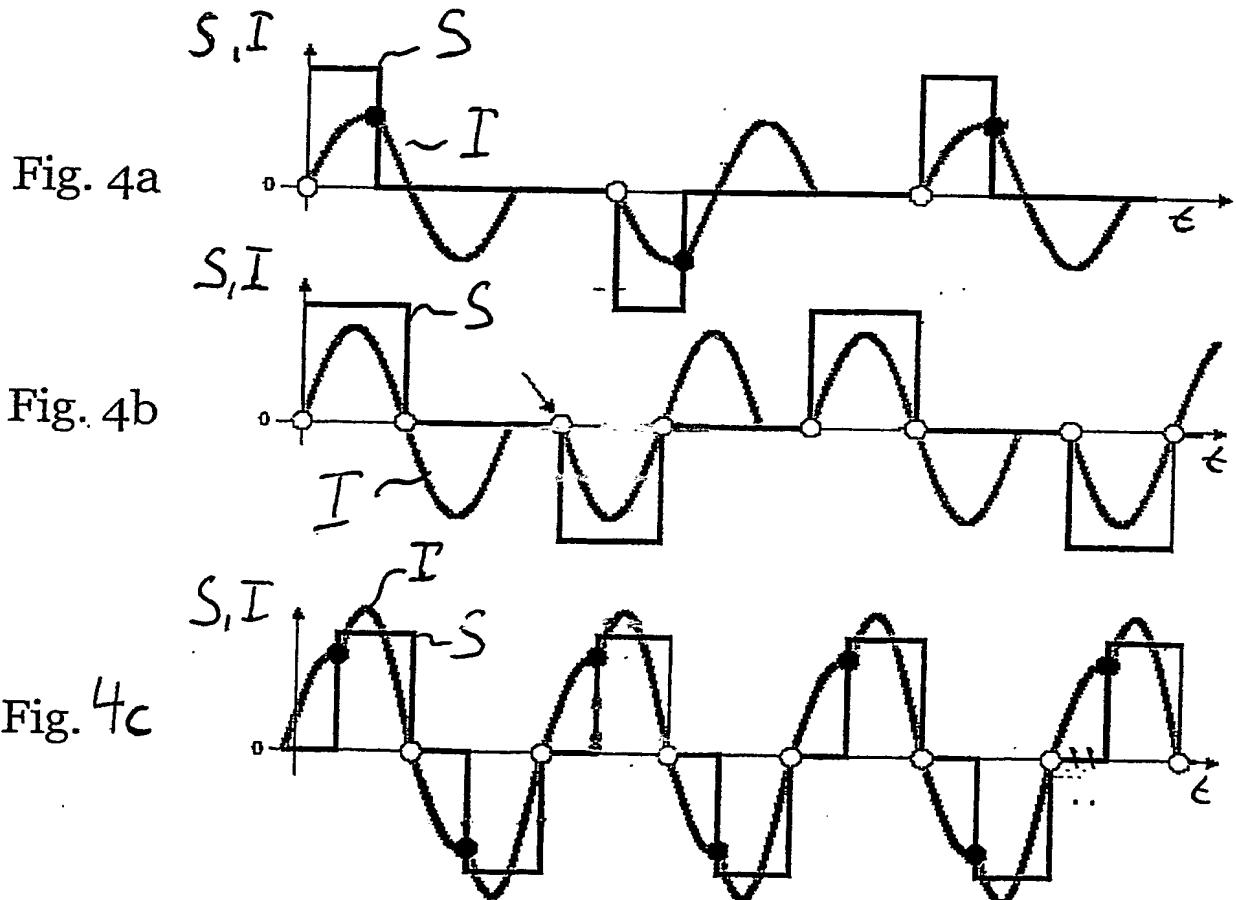
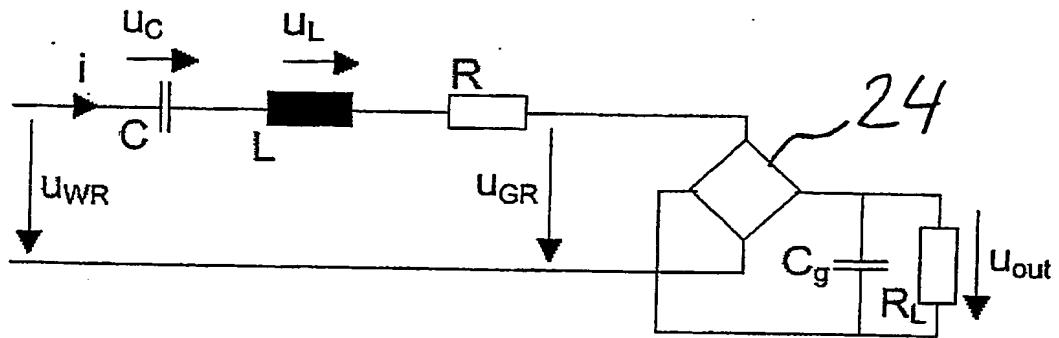


Fig. 5

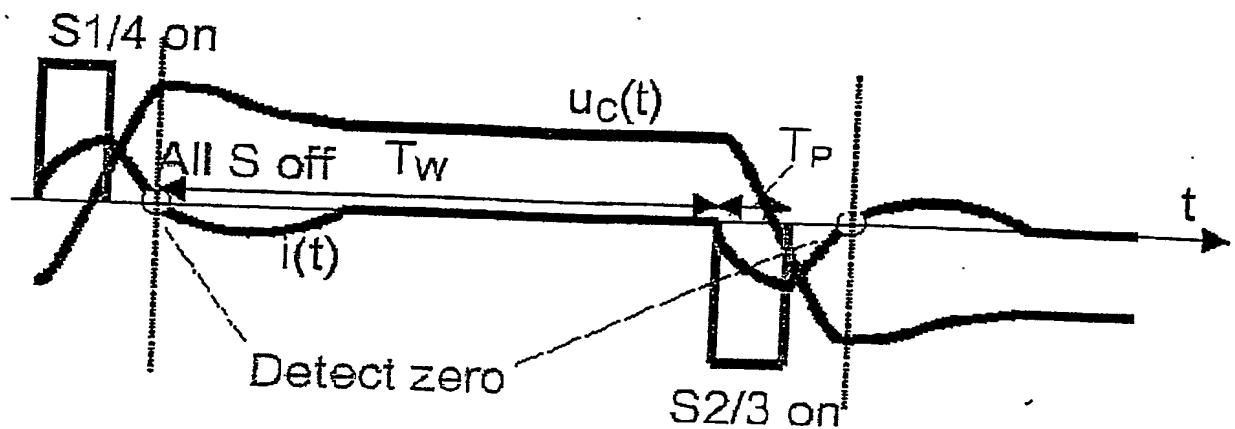


Fig. 6

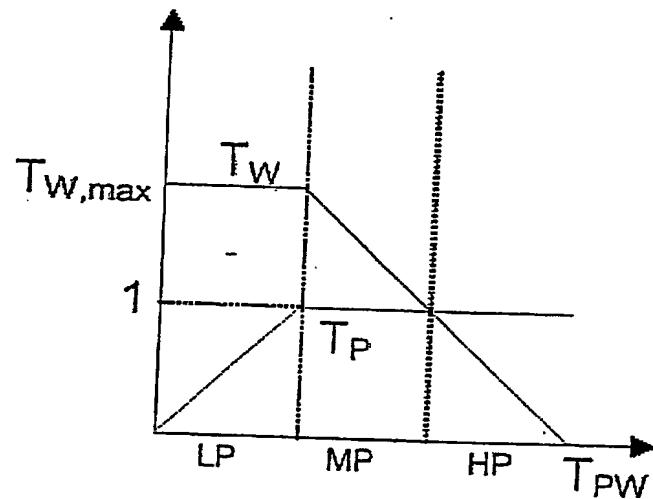


Fig. 7 10 ↴

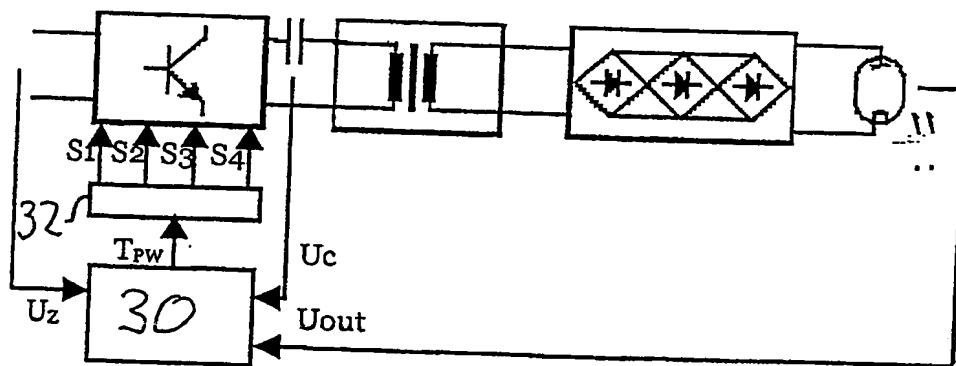


Fig. 8

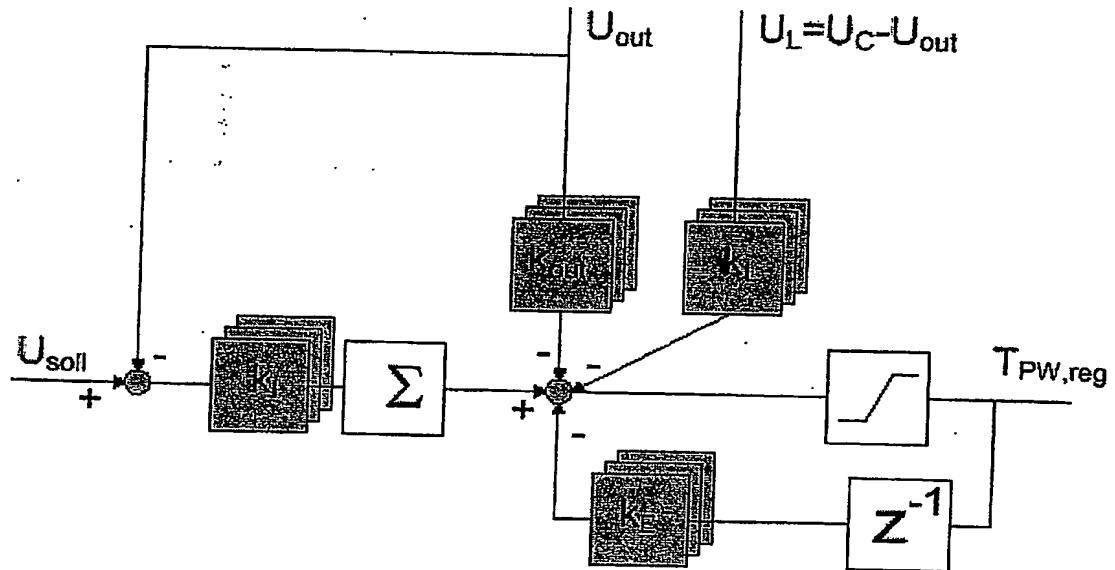


Fig. 9

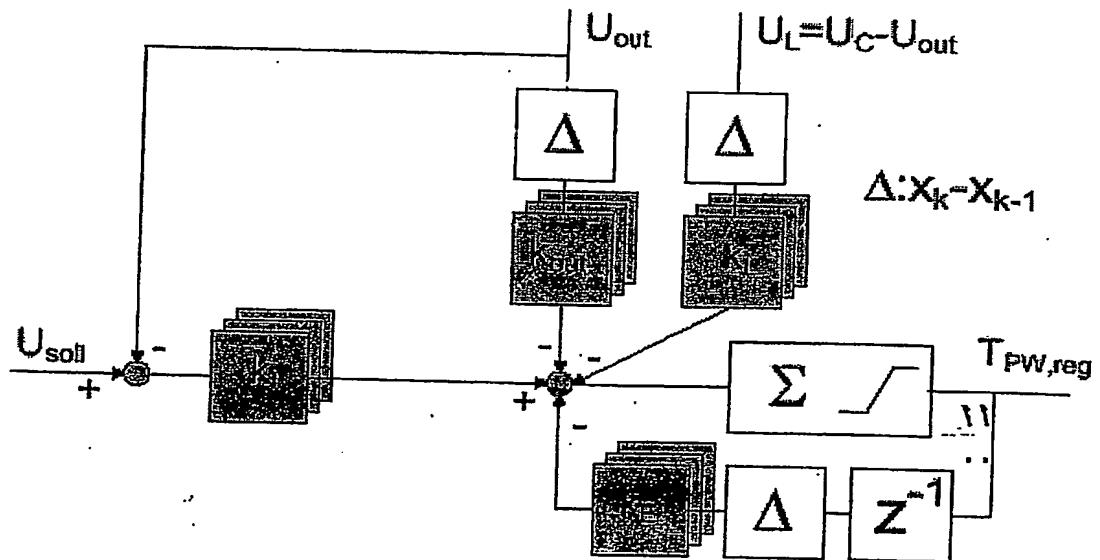


Fig. 10

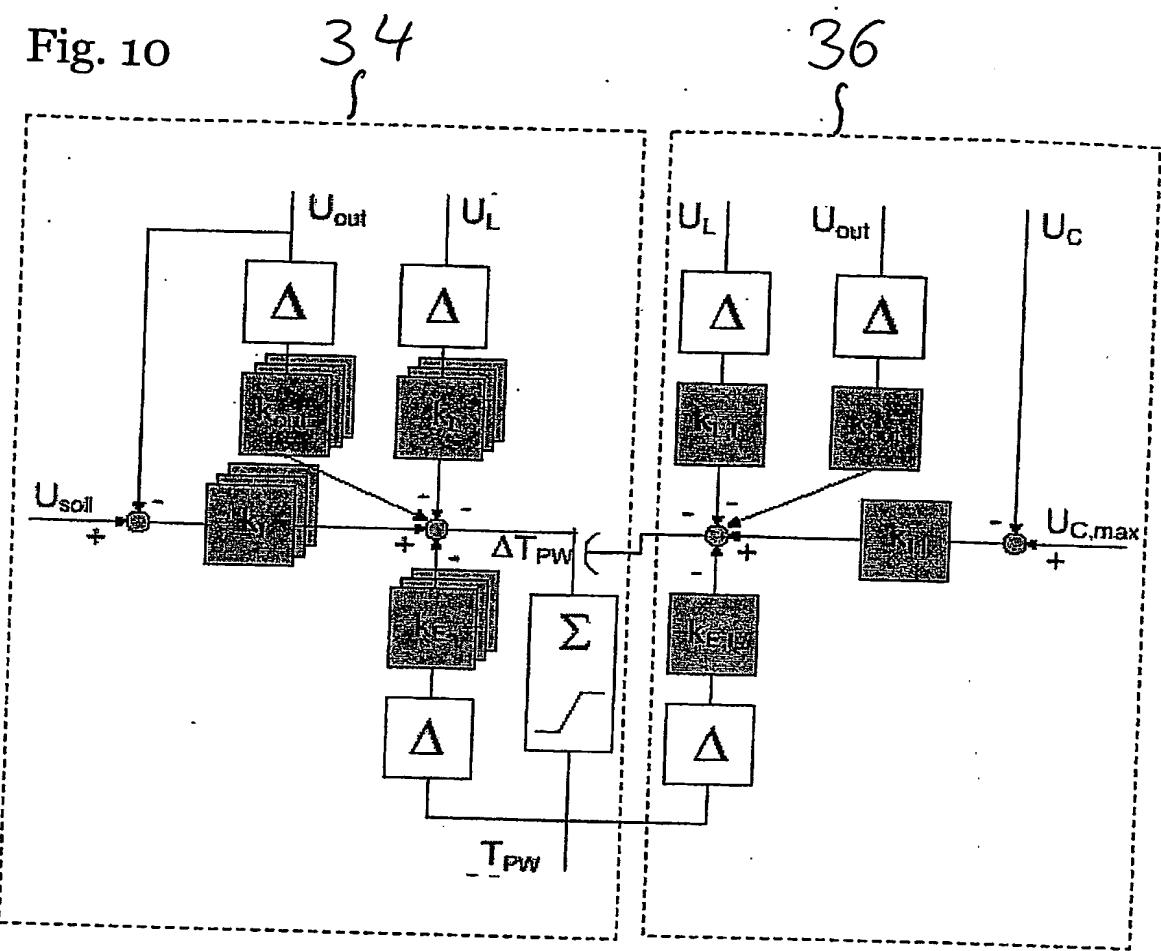


Fig. 11

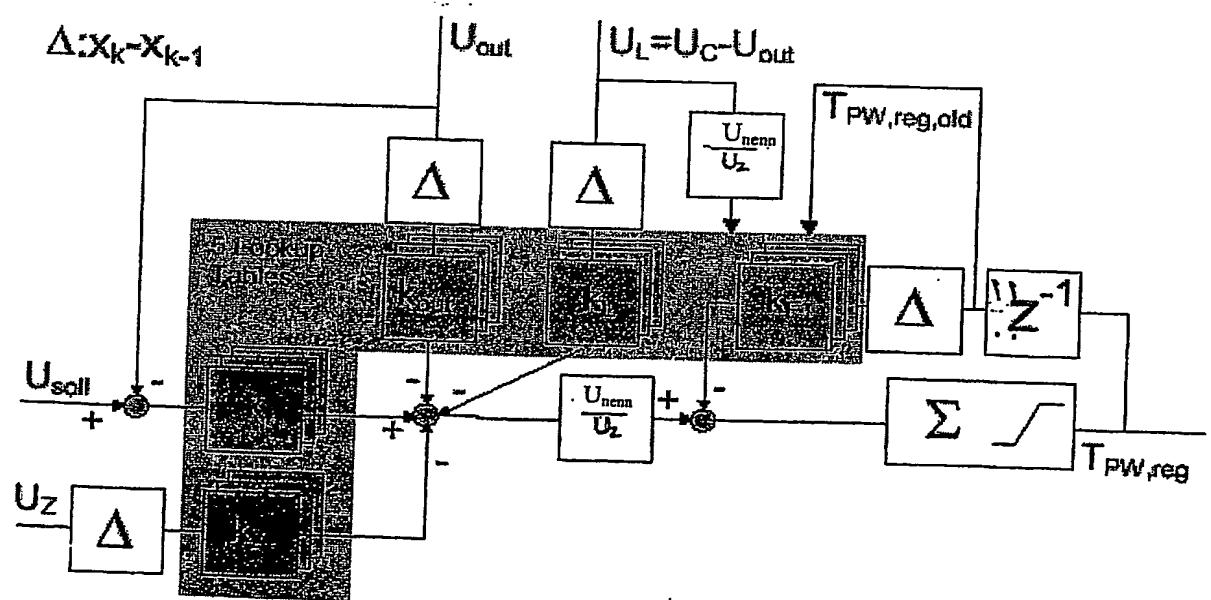
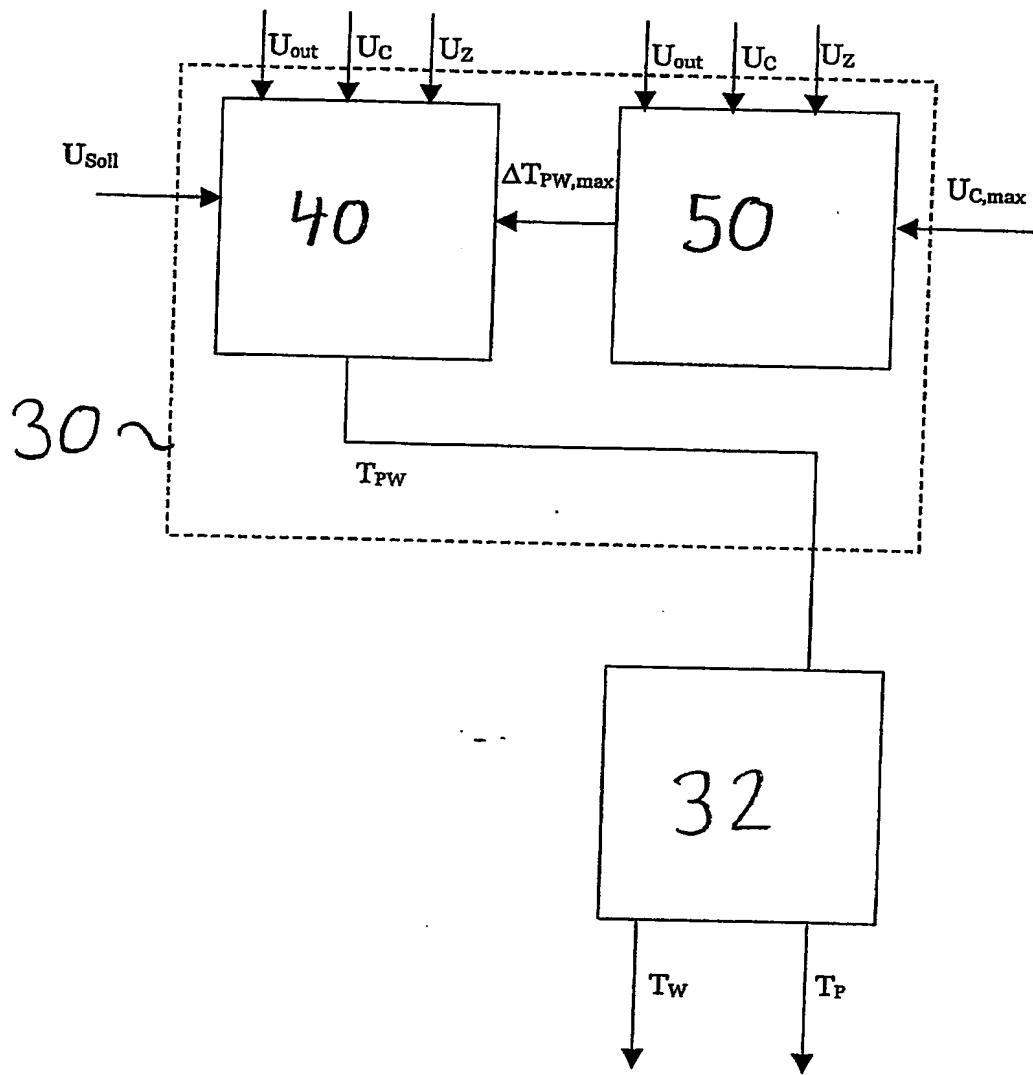
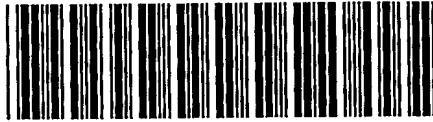


Fig. 12



PCT Application
PCT/IB2004/000039



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

BLACK BORDERS

IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES

FADED TEXT OR DRAWING

BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING

SKEWED/SLANTED IMAGES

COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS

GRAY SCALE DOCUMENTS

LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT

REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY

OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.